

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© Ю.С. Коробов, 2012 г.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

г. Екатеринбург

© А.С. Прядко, 2012 г.

ИММ НАН Беларуси,

г. Минск, Республика Беларусь

© И.Л. Яковлева, 2012 г.

ИФМ УрО РАН

г. Екатеринбург

yukorobov@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЕ

В работе показаны сложности получения покрытий на алюминии, стойких к износу и ударам. Проведены исследования, показавшие возможность нанесения активированной дуговой металлизацией стальных покрытий толщиной до 4 мм с высокой адгезионной прочностью. Приведены примеры практического применения.

У алюминиевых сплавов сочетаются малая плотность, высокая относительно плотности механическая прочность, высокая коррозионная стойкость. Это обуславливает их применение в авиации, автомобилестроении, машиностроении, текстильной промышленности. Расширение их применения, как в указанных областях, так и в других, сдерживается недостаточной износостойкостью. Способы поверхностного упрочнения позволяют решать эту проблему, однако каждая группа имеет свои достоинства и недостатки (рис. 1).

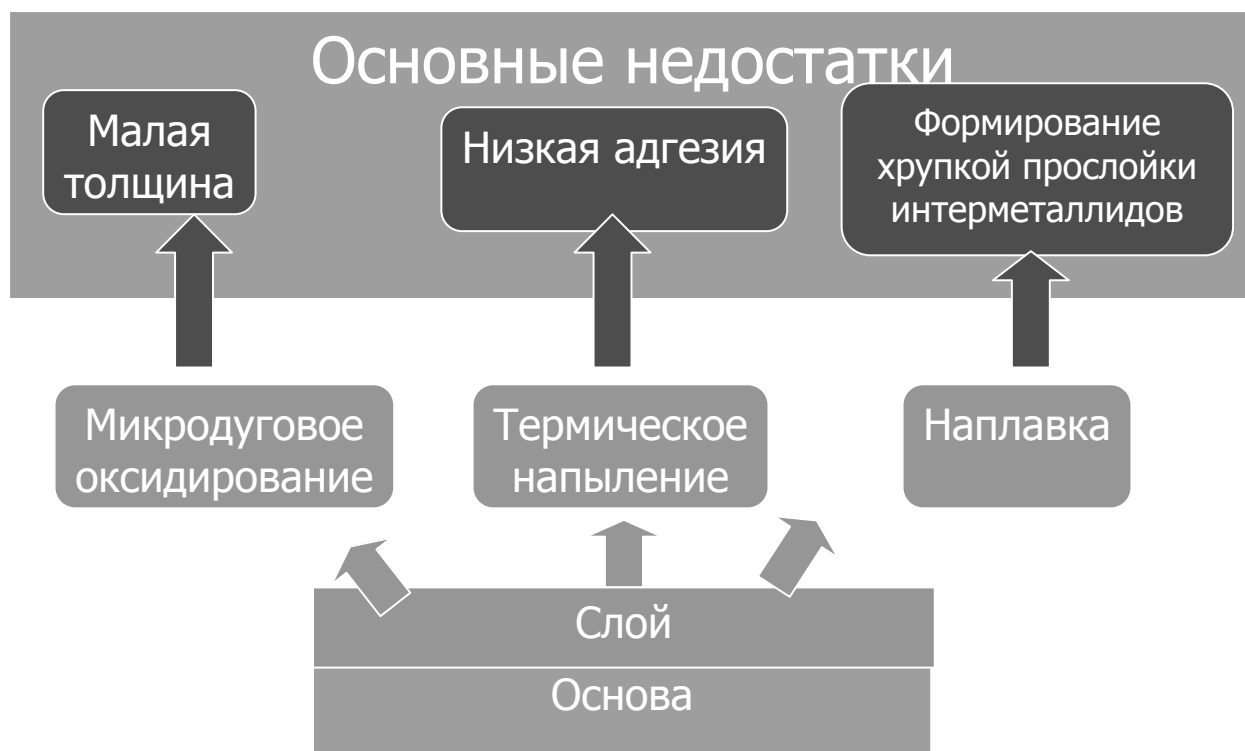


Рис. 1. Способы создания поверхностного слоя на алюминиевой основе

Из имеющихся видов износа выберем износ при скольжении и ударно-абразивный. Во многих узлах машин они являются основными. Ниже рассмотрены их особенности и меры противодействия в рамках схемы рис. 1. В конкретном случае сильного воздействия других видов износа (кавитация, фреттинг, усталостный и др.) необходимо разрабатывать дополнительные меры повышения стойкости.

Для повышения стойкости к износу при скольжении и абразивному нужно решать проблемы:

- износ при скольжении: улучшение поверхностных свойств, снижение схватывания, повышение адгезии поверхностного слоя;
- ударно-абразивный: улучшение поверхностных свойств, повышение усталостной прочности, повышение адгезии поверхностного слоя.

Из группы методов поверхностного упрочнения выберем термическое напыление. У других методов при воздействии на поверхность механических нагрузок есть ограничения, которые обусловлены их физическими особенностями:

- микродуговое оксидирование позволяет получать покрытия толщиной 10–100 мкм, которые могут проминаться на относительно мягкой алюминиевой основе;
- при наплавке происходит образование хрупких интерметаллидных прослоек, по которым будет идти разрушение поверхностного слоя;
- снятие/ослабление этих ограничений находится за рамками данной работы.

Для условий чистого трения эффективно применять сверхзвуковое газоздушное напыление (HVOF), которое позволяет получать покрытия твердостью до 71-73 HRC с производительностью распыления до 30 кг/ч [1] (рис. 2).

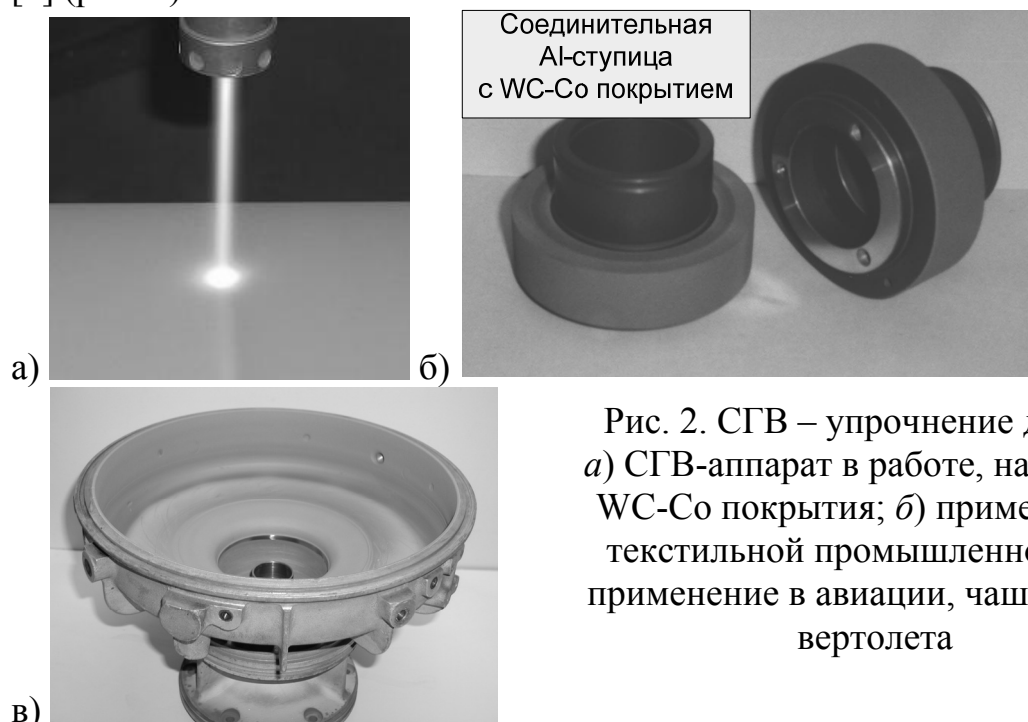


Рис. 2. СГВ – упрочнение деталей
а) СГВ-аппарат в работе, напыление WC-Co покрытия; б) применение в текстильной промышленности; в) применение в авиации, чашка винта вертолета

Для ударно-абразивного изнашивания характеристики покрытия должны удовлетворять нескольким условиям:

- слой должен иметь достаточную толщину, чтобы не промяться при воздействии внешних нагрузок;
- слой должен обладать высокой механической прочностью и износостойкостью;
- высокая адгезионная прочность;
- для наиболее прочных алюминиевых сплавов – термически упрочняемых деформируемых, вида Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mg-Si, – важно не перегреть их при технологической обработке выше температуры разупрочнения, порядка 180 °С.

Условия по толщине, механическим характеристикам слоя, ограничение нагрева относительно просто удовлетворяются подбором распыляемого материала, режимов напыления.

Наиболее сложно обеспечить адгезионную прочность вследствие особенностей оксидной пленки Al_2O_3 на алюминии. Этот металл обладает большим сродством к кислороду, что обуславливает быстрый рост толщины оксидной пленки. На алюминии в течение первых секунд ее толщина достигает определенной величины, затем ее рост замедляется и прекращается после 70–80 суток (рис. 3).

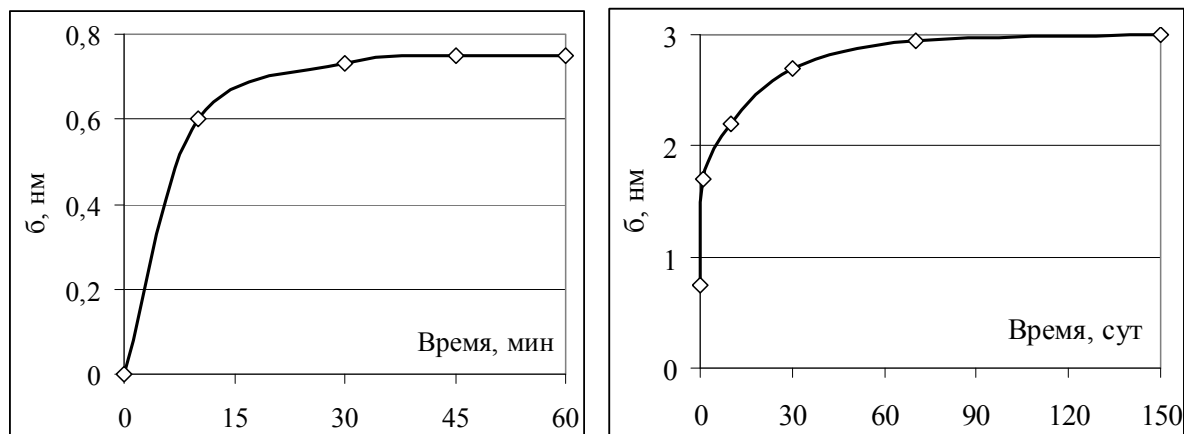


Рис. 3. Кинетика роста естественной оксидной пленки на Al при н.у.

Ряд свойств оксидной пленки [2–6] затрудняют и получение высокой адгезионной прочности между покрытием и Al основой:

- Температура плавления более чем в 3 раза выше, чем у алюминия (рис. 4), что затрудняет ее удаление.
- При нагреве пленка подвержена трещинообразованию из-за большой разницы в коэффициентах термического расширения (рис. 5). Это приводит к ускорению роста ее толщины, особенно заметному при температурах выше 500 °С.
- Вследствие малой разницы величины параметра кристаллической решетки, менее 2 %, между оксидной пленкой и алюминием высокая прочность сцепления.

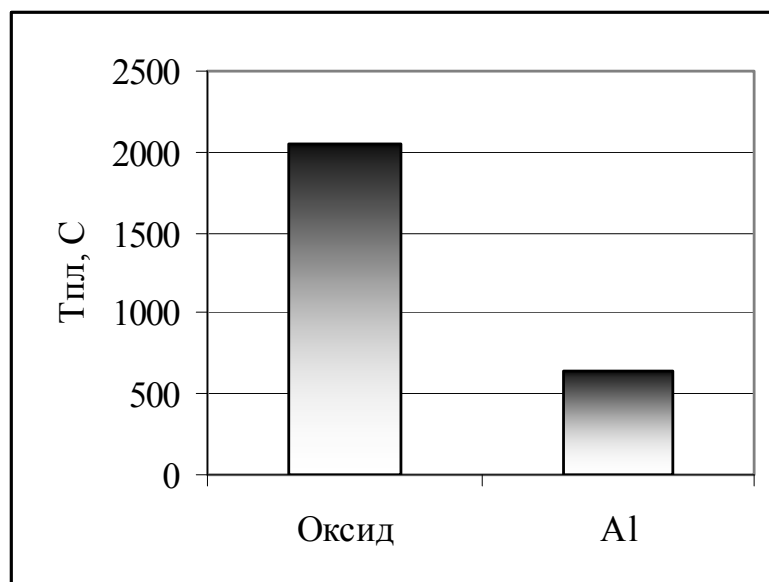


Рис. 4. Температура плавления алюминия и его оксида

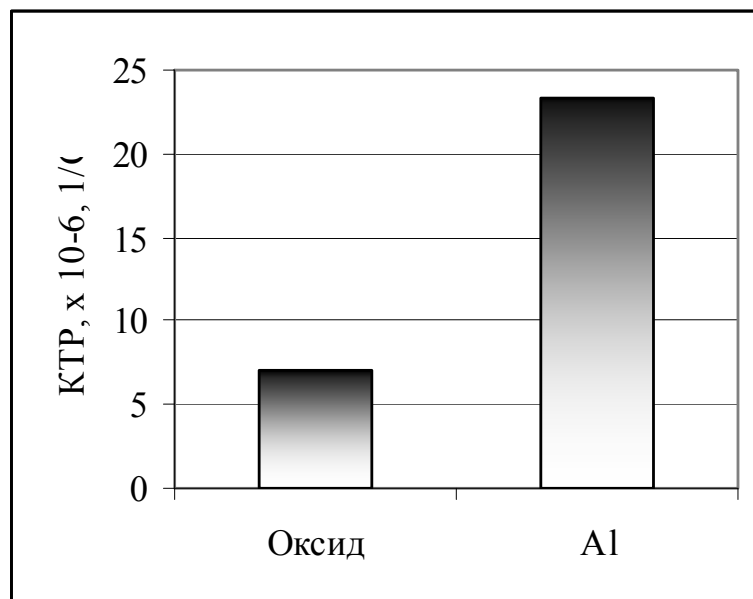


Рис. 5. Коэффициент термического расширения алюминия и его оксида

Для уменьшения влияния этих факторов была разработана специальная технология нанесения покрытия на алюминий, включающая предварительное нанесение модифицированного никромового подслоя (рис. 6).

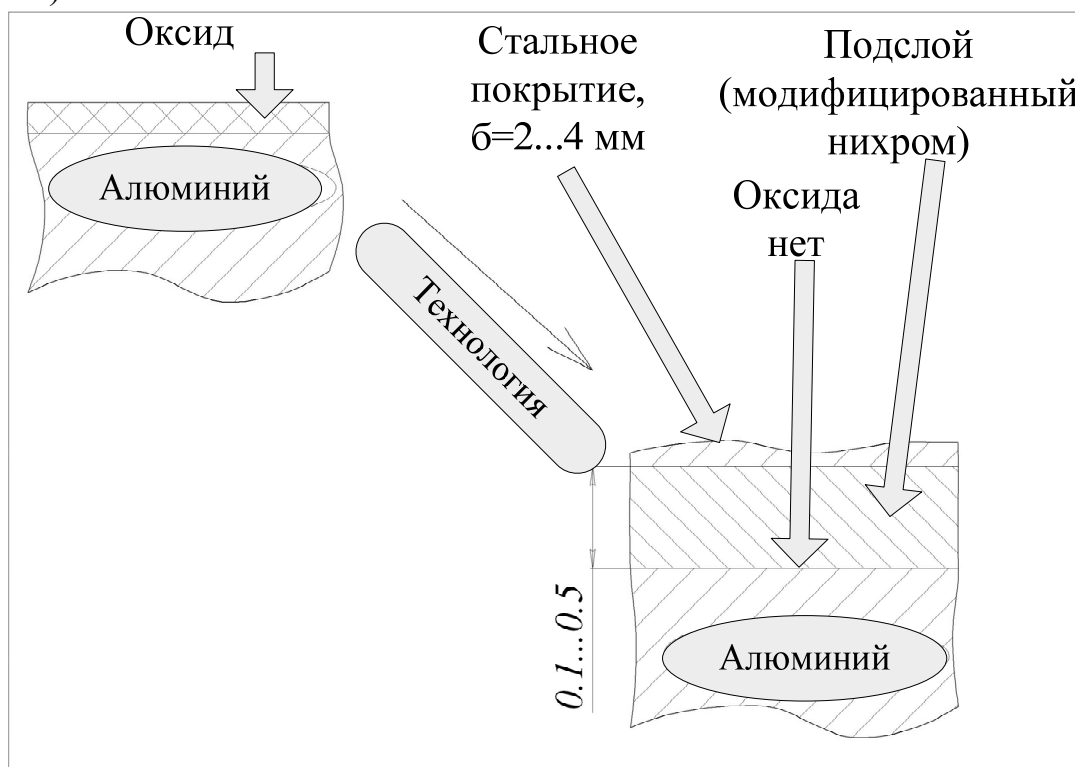


Рис. 6. Схема повышения адгезионной прочности стального покрытия на алюминии

Предложенная схема была реализована способом активированной дуговой металлизации (АДМ), разработанном на основе моделирования

процесса дуговой металлизации (ДМ) [7–9]. К отличительным особенностям АДМ относится совместное использование продуктов сгорания восстановительных смесей в качестве транспортирующего газа, определенного взаимного расположения сопел и электродов, целенаправленного воздействия на зону горения дуги (рис. 7).

АДМ-аппараты отличаются улучшенными выходными характеристиками в сравнении с ДМ-аппаратами (рис. 8). При этом производительность, до 18 кг/ч по стали, и тепловая эффективность процесса остались на уровне ДМ. Результаты промышленных испытаний показали, что для большой группы покрытий качество металлических износостойких АДМ-покрытий одного уровня с плазменными. АДМ-оборудование и технологии нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [10].

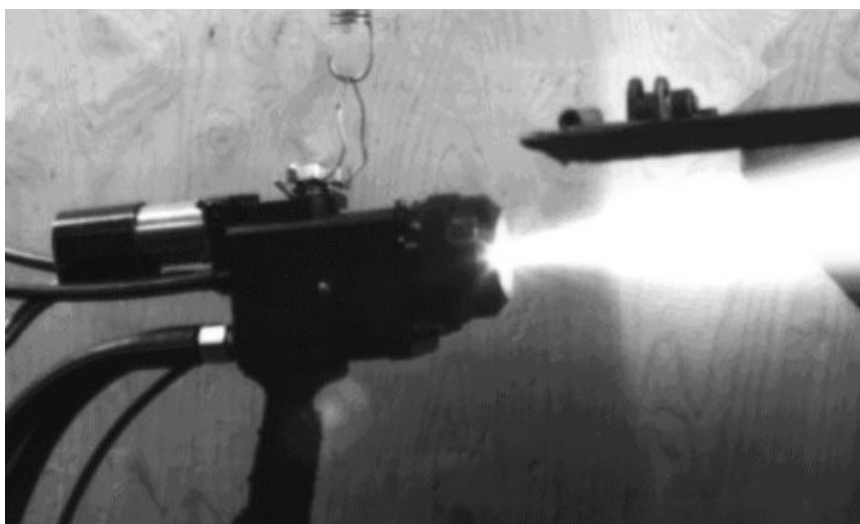


Рис. 7. Напыление стали АДМ-аппаратом

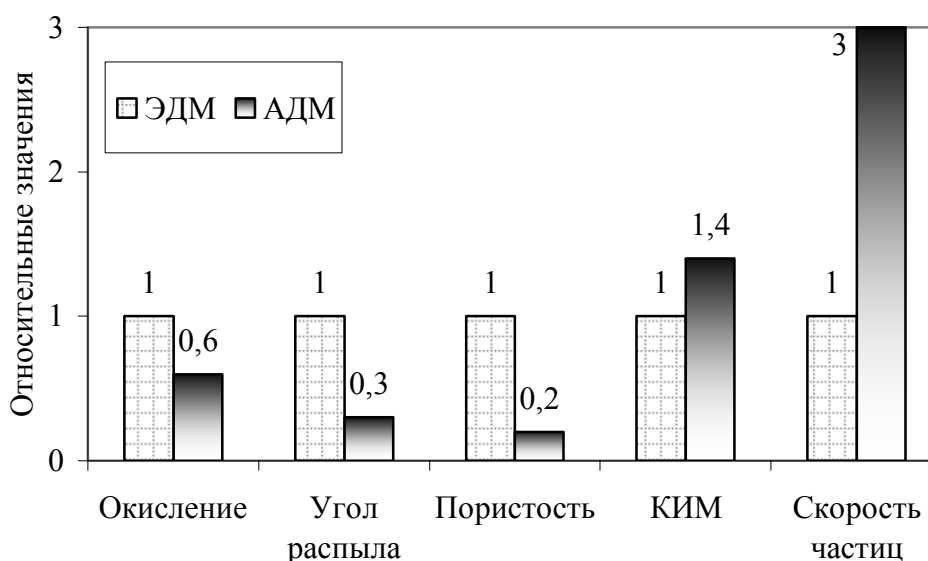


Рис. 8. Сравнение параметров ДМ и АДМ

Проведенные исследования [11; 12] показали, что на границах переходов в системе «стальное покрытие-подслой-основа» несплошности практически отсутствуют (рис. 9). Анализ величины и состава переходной зоны на микроанализаторе Superprob-JXA-733 показал, что между алюминиевой основой и нихромовым подслоем присутствует диффузионная зона, в которой постепенно изменяется содержание элементов. Ее величина находится в интервале 2–11 мкм (рис. 10). Это обусловило качественное повышение, в 3–3,5 раза, адгезионной прочности покрытия (рис. 11).

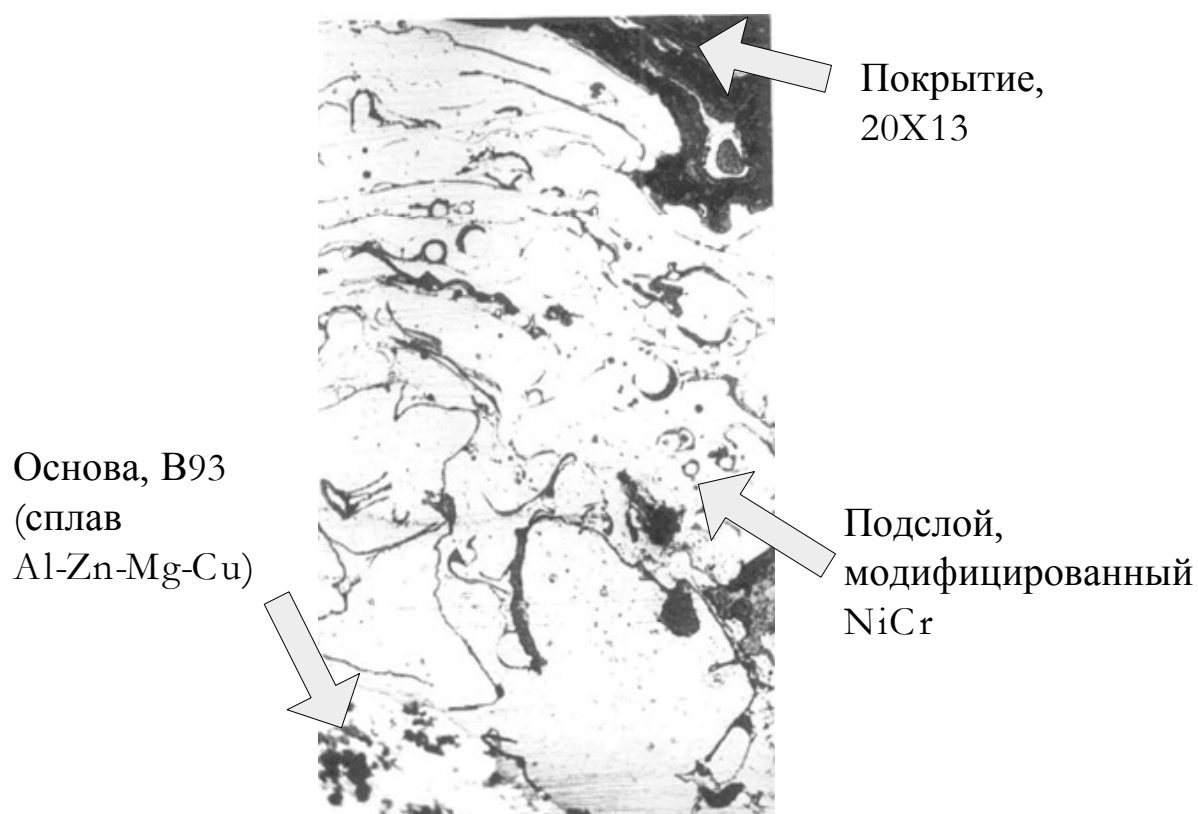
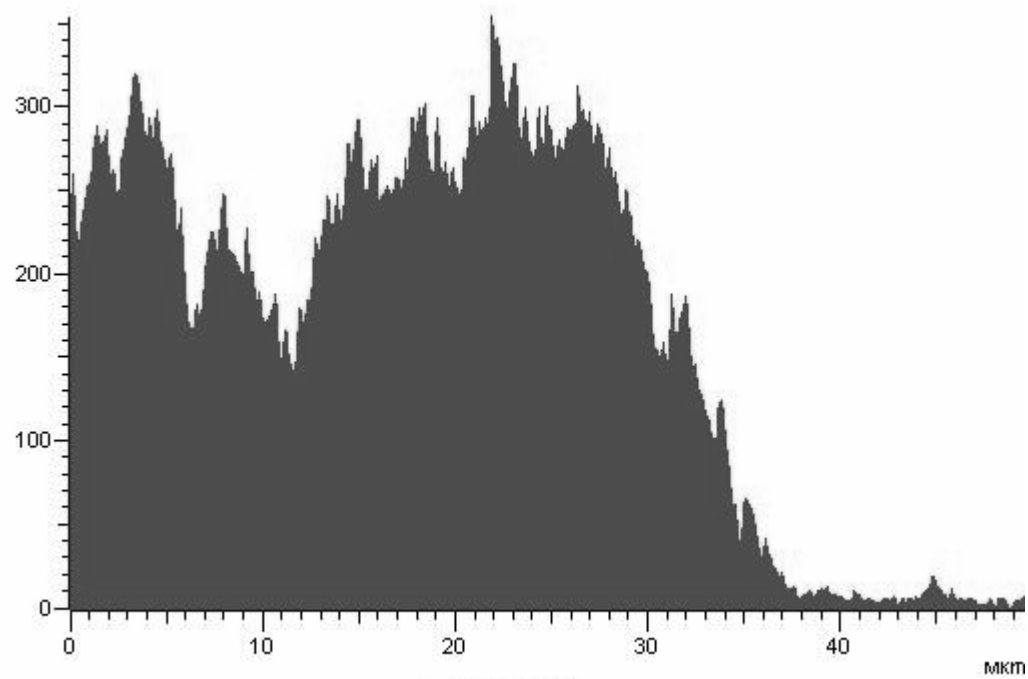
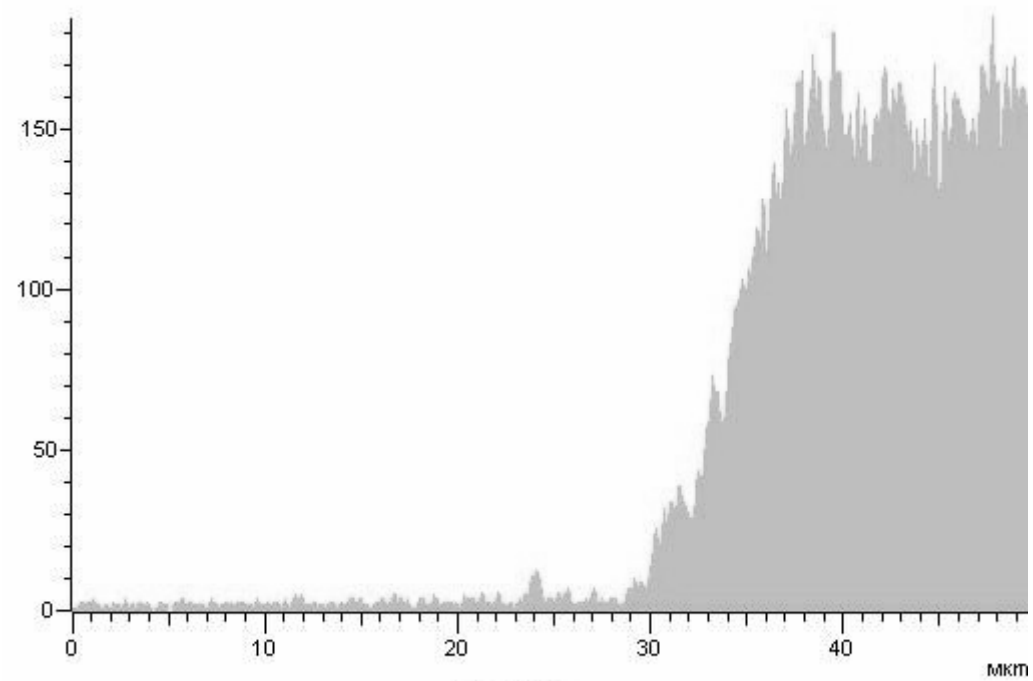


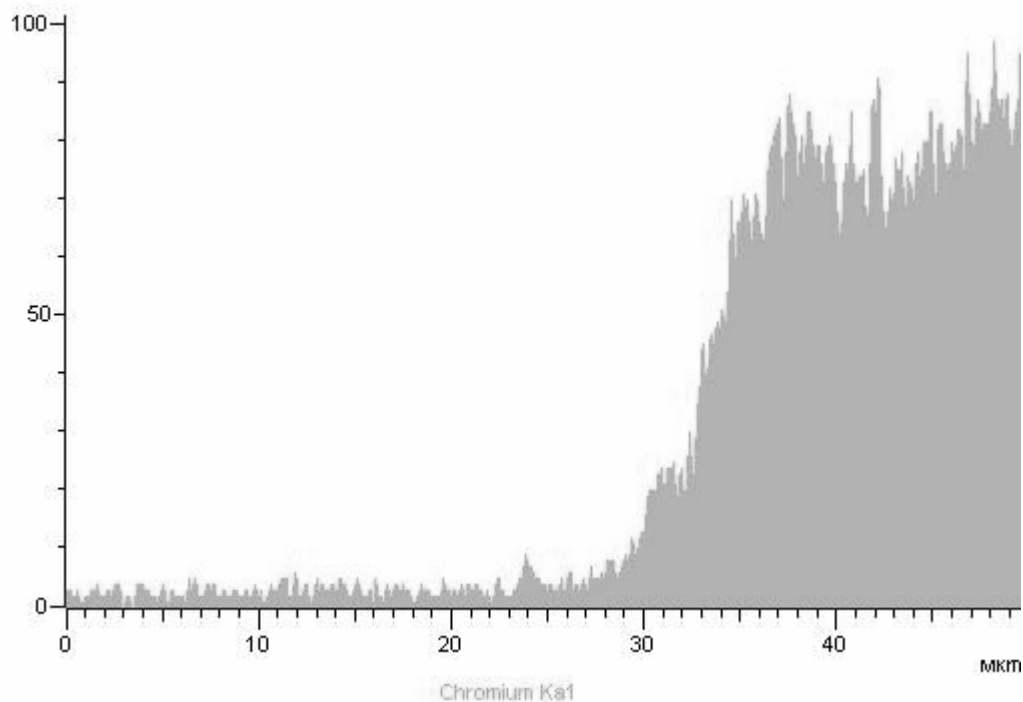
Рис. 9. Структура переходной зоны, х 250



a)



b)



в)

Рис. 10. Изменение содержания элементов на границе «алюминий – подслой нихрома», х 2500: а) алюминий; б) никель; в) хром

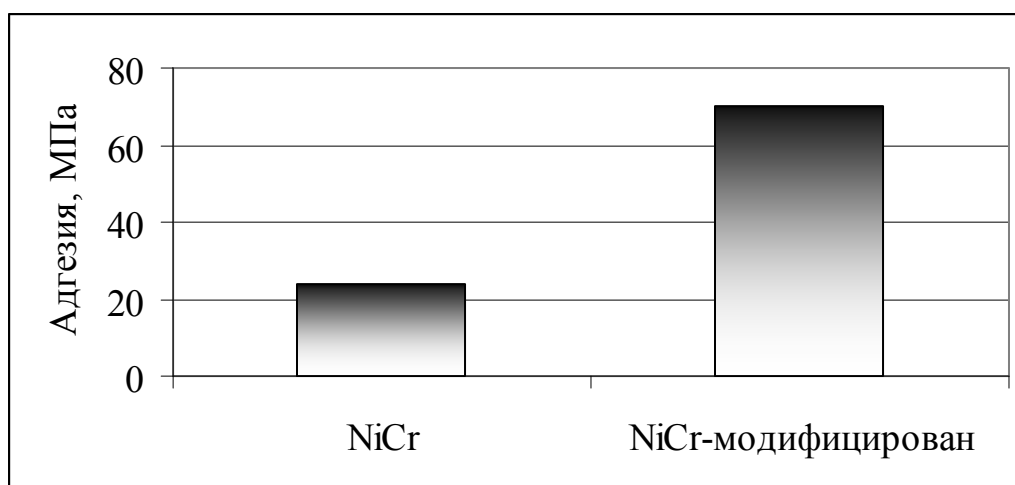


Рис. 11. Адгезионная прочность стального покрытия с NiCr подслоем, полученным по различным вариантам

Разработанные технология и оборудование позволяют наносить на детали из алюминиевых сплавов износостойкие покрытия с повышенной прочностью сцепления, выдерживающие высокие контактные нагрузки при ударном нагружении:

- Микротвердость
- Контактные нагрузки
- Степень окисления покрытия

HV 800
до 100 МПа при наличии ударов
до 3 %

- Прочность сцепления с алюминиевой основой 60–70 МПа
- Толщина покрытия 0,5–4,0 мм
- Термическое разупрочнение алюминиевой основы не происходит

Применение технологии:

- Упрочнение опорного алюминиевого катка гусеничного тягача Ø630 мм и Ø670 мм (Уралтрансмаш, г. Екатеринбург). По сопрягаемой с гребнем трака поверхности вместо установки стальной реборды нанесено АДМ-покрытие (рис. 12). Катки успешно прошли ходовые испытания в объеме гарантийного пробега (рис. 13).

- Изготовление алюминиевых прокладок с износостойким покрытием в качестве мягкой прослойки в парах трения между сопряженными поверхностями железнодорожного подвижного состава (УО ВНИИЖТ, г. Екатеринбург). Успешно прошли ходовые испытания в объеме 130 тыс. км прокладки, установленные на грузовом вагоне между наклонной плоскостью надрессорной балки и фрикционным клином гасителя колебаний тележки (рис. 14). Пластичная алюминиевая основа позволяет устанавливать прокладки на необработанную литейную поверхность.

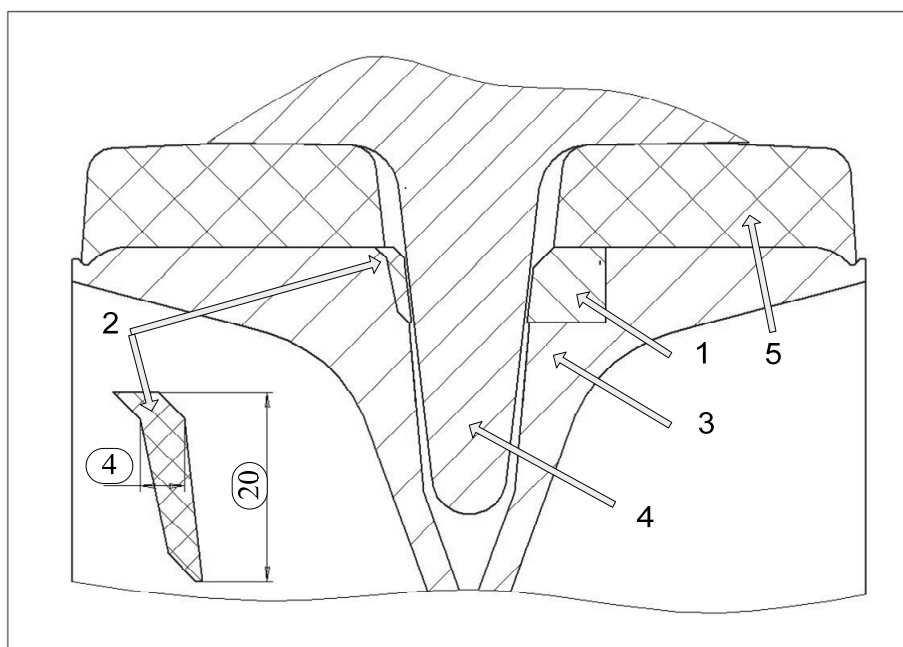


Рис. 12. Схема опорного катка:

1 – существующая реборда; 2 – напыленное покрытие взамен реборды; 3 – алюминиевый диск; 4 – гребень трака гусеницы; 5 – резиновая шина



Рис. 13. Опорный каток гусеничного тягача $\varnothing 630$ мм:
 а) до испытаний; б) после испытаний в объеме гарантийного пробега

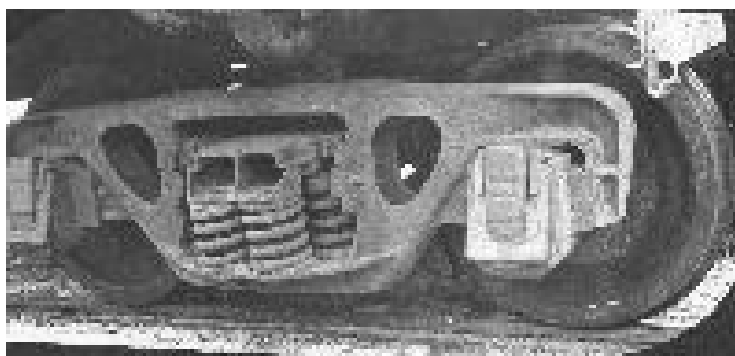


Рис. 14. Узел грузового вагона. По наклонной плоскости наддрессорной балки установлены алюминиевые прокладки с покрытием. В 2,5 раза снижается суммарный износ сопряженных деталей

Выводы

1. Выполнены исследования по увеличению адгезионной прочности износостойких покрытий на алюминиевой основе
2. Проведено изучение структуры и свойств переходной зоны в системе «стальное покрытие-подслой-основа», которое показало, что высокая адгезия обусловлена наличием здесь диффузионной связи.
3. На основе результатов исследований разработана технология нанесения износостойких покрытий на алюминий, позволяющая обеспечить надежность деталей с покрытием в условиях контактных нагрузок до 100 МПа при наличии ударов и абразивного воздействия.

Список использованных источников

1. Коробов Ю.С. Нанесение защитных покрытий сверхзвуковым газопламенным напылением // Теплоэнергетика. 2009. № 2. С. 48–50.

2. *Никифоров Г.Д.* Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 264 с.
3. *Фридляндер И.Н.* Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
4. *Смирнов Г.Н.* Прогрессивные способы пайки алюминия. М.: Металлургия, 1981. 240 с.
5. *Никитинский А.М.* Пайка алюминия и его сплавов. М.: Машиностроение, 1983. 192 с.
6. Окисление металлов. М.: Металлургия, 1968. Т. 1. 449 с.; Т. 2. 448 с.
7. *Коробов Ю.С., Бороненков В.Н.* Расчет параметров движения, нагрева и окисления частиц при электродуговой металлизации // Сварочное производство. 1998. № 3. С. 9–13.
8. *Коробов Ю.С., Бороненков В.Н.* Кинетика взаимодействия напыляемого металла с кислородом при электродуговой металлизации // Сварочное производство. 2003. № 7. С. 30–36.
9. *Коробов Ю.С.* Оценка сил, действующих на распыляемый металл при электрометаллизации // Автоматическая сварка. 2004. № 7. С. 23–27.
10. *Коробов Ю.С.* Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. 2005. № 2. С. 47–50.
11. *Коробов Ю.С., Полякова А.М., Яковлева И.Л., Счастливцев В.М.* Исследование структуры и свойств переходной зоны в алюминиевых деталях с напыленным стальным покрытием // Сварочное производство. 1996. № 12. С. 20–22.
12. *Korobov Yu., Baranovski V., Pryadko A., Schastlivtsev V.* Arc Spraying of Wear - Resistant Steel Coatings on Aluminum Parts // Surface Modification Technologies: Int. Conf. SMT25, Trollhattan. Sweden. June 20-22, 2011.